第 43 卷　第 1 期
2023 年 2 月
桂林电子科技大学学报
Journal of Guilin University of Electronic Technology
Vol. 43, No. 1
Feb. 2023

基于压缩感知的频率分集阵列 SAR 三维成像方法

崔昆仑[1]，欧阳缮[1,2]，廖可非[1,2]，李晶晶[1]

（1. 桂林电子科技大学 信息与通信学院，广西 桂林　541004；
2. 桂林电子科技大学 卫星导航定位与位置服务国家地方联合工程研究中心，广西 桂林　541004）

摘　要：基于宽带发射信号的相控阵三维合成孔径雷达(SAR)系统硬件设计复杂且接收信号不易分离。通过将频率分集阵列应用到三维 SAR 中，线阵各阵元只需发射单频信号便可获得宽带观测性能，可大大降低系统硬件要求，但由于频率分集阵列的回波信号具有空间-频率稀疏特性，采用基于匹配滤波思想的传统后向投影算法成像时，分辨率受限且图像旁瓣较高。针对此问题，提出一种基于压缩感知的随机频率分集阵列 SAR 三维成像方法。该方法通过在切航迹向随机稀疏选取阵元，在沿航迹向随机稀疏选取观测位置，实现对回波数据的二维稀疏采样。在成像部分，采用正交匹配追踪算法对空间目标散射系数进行重构。仿真和实测实验结果表明，该压缩感知成像方法不仅可以减少频率分集阵列三维 SAR 系统的数据处理量，还能够有效抑制雷达图像旁瓣，成像质量显著提高。利用压缩感知算法，频率分集阵列三维 SAR 可以在回波稀疏的情况下准确重构目标信息，验证了所提方法的合理性和有效性。

关键词：频率分集阵列；合成孔径雷达；压缩感知；三维成像；正交匹配追踪

中图分类号：TN95　　　**文献标志码**：A　　　**文章编号**：1673-808X(2023)01-0055-08

Frequency diverse array 3D-SAR imaging method based on compressed sensing

CUI Kunlun[1], OUYANG Shan[1,2], LIAO Kefei[1,2], LI Jingjing[1]

(1. School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;
2. State and Local Joint Engineering Research Center for Satellite Navigation and Location Service,
Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The hardware design of phased array three-dimension synthetic aperture radar (SAR) system based on wideband transmission signals is complicated, and the received signals are difficult to separate. By applying the frequency diverse array (FDA) to 3D-SAR, each array element only needs to transmit a single frequency signal to obtain wideband observation performance, which greatly reduces the hardware requirements of system. However, due to the space-frequency sparseness of FDA echo signals, the resolution is limited and the sidelobes of radar images are relatively high when using the back projection (BP) algorithm based on matched filtering. To solve this problem, this paper proposes a random frequency diverse array 3D-SAR imaging method based on compressed sensing (CS). The array elements in the tangent-track and the observation positions in the along-track are selected randomly and sparsely to realize two-dimensional sparse sampling of echo data. In the imaging part, orthogonal matching pursuit (OMP) algorithm is used to reconstruct the scattering coefficient of targets. Simulation and experimental results show that CS method not only reduces the data processing amount of FDA-3D-SAR system during imaging, but also effectively suppresses the sidelobes of radar images, and the imaging quality is significantly improved. By using the compressed sensing algorithm, FDA-3D-SAR can accurately reconstruct the information of space targets when the echo is sparse, which verifies the rationality and effectiveness of the proposed method.

Key words: frequency diverse array; synthetic aperture radar; compressed sensing; 3D imaging; orthogonal matching pursuit

收稿日期：2021-03-08
基金项目：国家自然科学基金(61631019,61701128,61871425)；广西创新驱动发展专项(桂科 AA21077008)；桂林电子科技大学研究生教育创新计划(2020YCX035)
通信作者：廖可非(1984—)，男，副教授，博士，研究方向为雷达散射截面积测量、认知雷达。E-mail：kefeiliao@guet.edu.cn
引文格式：崔昆仑，欧阳缮，廖可非，等. 基于压缩感知的频率分集阵列 SAR 三维成像方法[J]. 桂林电子科技大学学报，2023，43(1)：55-62.

下视线阵三维合成孔径雷达(synthetic aperture radar,简称 SAR)通过控制阵列天线的空间运动合成虚拟面阵,结合距离脉冲压缩技术获得目标的三维分辨能力,是一种较为灵活的成像体制[1-2]。然而,这种基于宽带发射信号的 SAR 系统存在射频端硬件设计复杂和接收信号无法有效分离等问题。与相控阵不同,频率分集阵列(FDA)[3-5]在阵元间引入一个小的频率增量,通过频率差控制相邻阵元的相位差,使得阵列波束同时包含角度和距离信息,系统发射单频信号也可获得高分辨的距离向。针对 FDA 波束方向图在距离和角度上的耦合问题,文献[6]提出随机 FDA 的概念,通过将 FDA 各阵元的频率增量系数设为离散随机整数,可得到理想的点状波束方向图。基于此模型,文献[7]提出一种基于随机频偏调制的频率分集阵雷达通信一体化波形,可在占用较少雷达脉冲资源的前提下有效传输通信信息。将 FDA 应用到 SAR 系统中,可充分发挥其特性,并给雷达系统整体设计提供新的思路。文献[8]利用 FDA 发射波束的距离依赖性提高 SAR 成像的距离分辨率。文献[9]提出一种基于 FDA 的星载 SAR 角度-距离信号解模糊方法,文献[10]将其应用到解决星载 SAR 的距离-多普勒模糊问题中。文献[11]介绍了基于 FDA 的星载 SAR 欺骗干扰方法,文献[12]给出该模型下的干扰波形设计方法。文献[13]提出一种基于 FDA 的三维 SAR 成像模型,将实阵列由相控阵改为频率分集阵列,并验证了其合理性。

传统成像算法的基础是匹配滤波,若成像处理采用全部回波,会增大数据处理的难度;若对孔径稀疏采样,又会使得成像结果产生很高的旁瓣。针对此问题,Baraniuk 等[14]将压缩感知(CS)理论引入雷达成像中。压缩感知方法基于回波信息的冗余性,对信号在空间的稀疏性进行充分利用,只需随机采样较少的数据,便能精确重构出原始信号。近年来,国内外对此做了大量研究工作。例如,文献[15]提出基于分段重建策略的压缩感知 SAR 成像方法,通过子成像场景拼接减少计算所需的内存;文献[16]提出一种下视 3D-SAR 无网格 L1 范数正则化稀疏重建方法,以实现切航向的超分辨;文献[17]提出一种结合二维失配补偿的下视三维 SAR 成像方法,直接对二维矩阵进行稀疏线性模型化处理;文献[18]提出一种基于酉变换和实值稀疏表示的 MIMO 阵列 SAR 三维快速成像算法;文献[19]提出一种基于稀疏贝叶斯正则化的阵列 SAR 高分辨三维成像算法等。

上述重构及相应的改进算法都局限于相控阵 3D-SAR 模型,如何合理地构建 FDA 体制下的三维 SAR 成像系统模型,并将压缩感知方法应用其中,实现场景目标的高质量成像,亦是值得研究的问题。鉴于此,提出一种在航迹向和切航向对回波数据进行二维稀疏采样并利用正交匹配追踪算法重构目标散射系数的 FDA 三维 SAR 成像方法。实验结果表明,压缩感知方法在减少回波数据处理量的同时,可有效抑制图像旁瓣,提高成像质量。

1 成像模型

1.1 频率分集阵列三维 SAR 系统模型

频率分集阵列三维 SAR 系统的几何模型如图 1 所示。机载运动平台沿 x 轴方向(以下称航迹向)以速度 V 匀速飞行,平台上的 FDA 实阵列平行于 y 轴方向(以下称切航向)均匀排布,阵元间距为 d_y。FDA 各阵元的频率增量从频偏集合 $\{0\Delta f, 1\Delta f, \cdots, (L-1)\Delta f\}$ 中随机选取,其中:Δf 为单位频率增量;L 为频偏系数的最大值。在航迹向的各个观测位置,FDA 实阵列都要从频偏集合中重新随机选取一组频率增量。相邻观测位置的间距 $d_x = VT_r$,其中 T_r 为 FDA 发射信号的脉冲重复周期。FDA 各阵元在航迹向的运动轨迹也可看作虚拟线阵,其阵元间距即为观测间隔 d_x。FDA 各阵元均采用单发单收的工作模式,接收信号相互独立,且初始相位保持相同。

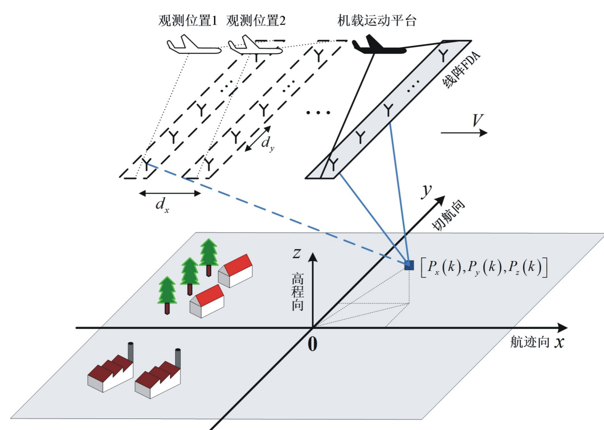


图 1 频率分集阵列三维 SAR 系统几何模型

假设实阵列 FDA 的阵元数为 N,航迹向的观测位置数为 M,则第 m 个观测位置第 n 个阵元的载频为

$$f_{m,n} = f_0 + l_{m,n}\Delta f, \tag{1}$$

其中:f_0 为参考阵元载频,$m=1,2,\cdots,M$;$n=1,2,\cdots,N$;$l_{m,n} \in \{0,1,\cdots,L-1\}$。

FDA 各阵元发射单频窄带信号,则第 m 个观测位置第 n 个阵元的发射信号为

$$S_{m,n}(t)=\mathrm{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right)\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi(f_0+l_{m,n}\Delta f)t}, \tag{2}$$

其中：T_p 为脉冲宽度；t 为时间变量；信号包络

$$\mathrm{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right)=\begin{cases}1, & |t|\leqslant\dfrac{T_p}{2},\\ 0, & |t|>\dfrac{T_p}{2}。\end{cases} \tag{3}$$

考虑噪声的影响，滤波后的回波信号可表示为

$$\tilde{y}_{m,n}(t)=\sum_{k=1}^{K}A_{m,n}(k)\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi(f_0+l_{m,n}\Delta f)(t-\tau_{m,n}(k))}+e_{m,n}(t), \tag{4}$$

其中：K 为成像场景中目标的个数，$k=1,2,\cdots,K$；$A_{m,n}(k)=\sigma(k)\mathrm{rect}[(t-\tau_{m,n}(k))/T_p]$，$\sigma(k)$ 为第 k 个目标的散射系数；$\tau_{m,n}(k)=2R_{m,n}(k)/c$，$c$ 为光速；$R_{m,n}(k)$ 为第 k 个目标与第 m 个观测位置第 n 个阵元间的欧氏距离。记第 k 个目标的直角坐标为 $[P_x(k),P_y(k),P_z(k)]$，则

$$R_{m,n}(k)=\sqrt{[P_x(k)-md_x]^2+[P_y(k)-nd_y]^2+[P_z(k)-H]^2}。 \tag{5}$$

对 $\tilde{y}_{m,n}(t)$ 中的时间变量，经下变频 $\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi f_0 t}$ 和傅里叶变换将残余相位项 $\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi l_{m,n}\Delta f t}$ 转化为常数处理后，最终送至成像处理器的信号为

$$y_{m,n}=\sum_{k=1}^{K}A_{m,n}(k)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi(f_0+l_{m,n}\Delta f)\tau_{m,n}(k)}+e_{m,n}。 \tag{5}$$

1.2　系统带宽和理论分辨率

不同于相控阵三维 SAR 通常使用大时宽带宽积信号，FDA 三维 SAR 各阵元的发射信号均为单频信号，系统带宽 B 则是由空间中若干个小的频率增量拼接而成。根据这个特性，FDA 三维 SAR 成像无需距离向脉压处理，其获取高程向的分辨率也不再依赖单个阵元发射的大带宽信号。

从收发共置天线 SAR 的角度，可得 FDA 三维 SAR 在航迹向和切航向的理论分辨率：

$$\rho_x=\frac{\lambda R_s}{2Md_x}, \tag{6}$$

$$\rho_y=\frac{\lambda R_s}{2Nd_y}, \tag{7}$$

其中：λ 为参考阵元发射信号的波长；R_s 为目标到虚拟 FDA 面阵的垂直距离。

对于高程向分辨率 ρ_z，由文献[20]可知，首先考虑频偏个数 $L=MN$ 且各阵元的频偏无重复选取的情况，此时

$$\rho_z=\frac{c}{2MN\Delta f}。 \tag{8}$$

当频偏个数 L 不等于阵元数 MN，且 FDA 各阵元的频率增量可重复选取时，由文献[6]可知，高程向分辨率可由统计特性评估为

$$\tilde{\rho}_z=\frac{c}{2L\Delta f}。 \tag{9}$$

2　成像算法

2.1　回波信号的稀疏选取与线性表示

首先对三维成像场景 $\boldsymbol{\Omega}$ 划分网格，网格点（即分辨单元）的总数记为 G，再对雷达回波数据进行稀疏采样，从航迹向 M 个观测位置中随机选取 M_s 个观测位置，从切航向 N 个线阵阵元中随机选取 N_s 个阵元，则第 g 个分辨单元与第 M_s 个观测位置第 N_s 个阵元的双程时延为

$$\tau_{m_s,n_s}(g)=\frac{2\sqrt{(x_g-m_sd_x)^2+(y_g-n_sd_y)^2+(z_g-H)^2}}{c}, \tag{10}$$

其中：(x_g,y_g,z_g) 为第 g 个分辨单元的直角坐标，$g=1,2,\cdots,G$；$m_s=1,2,\cdots,M_s$；$n_s=1,2,\cdots,N_s$。

稀疏采样后的回波信号 y_{m_s,n_s} 可表示为成像区域 $\boldsymbol{\Omega}$ 中所有分辨单元回波的总和，即

$$y_{m_s,n_s}=\sum_{g=1}^{G}\sigma(g)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi(f_0+q_{m_s,n_s}\Delta f)\tau_{m_s,n_s}(g)}, \tag{11}$$

其中：$\sigma(g)$ 为第 g 个分辨单元的散射系数；$q_{m_s,n_s}\Delta f$ 为第 m_s 个观测位置第 n_s 个阵元的频率增量。

将全部 G 个分辨单元的散射系数按顺序排成一个列向量 $\boldsymbol{\alpha}\in\mathbf{C}^{G\times1}$，则对应的测量向量为

$$\boldsymbol{\varphi}(m_s,n_s)=[\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi(f_0+q_{m_s,n_s}\Delta f)\tau_{m_s,n_s}(1)},\cdots,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi(f_0+q_{m_s,n_s}\Delta f)\tau_{m_s,n_s}(G)}]^{\mathrm{T}}。 \tag{12}$$

此时，回波信号可表示为

$$\boldsymbol{y}_{m_s,n_s}=\boldsymbol{\varphi}(m_s,n_s)^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{\alpha}。 \tag{13}$$

相较于整个三维成像空间，目标的散射系数是稀疏分布的。因此，稀疏基可选用单位矩阵[21]，即 $\boldsymbol{\Psi}=\boldsymbol{I}$。将稀疏采样后的回波信号排成一个列向量 $\boldsymbol{y}\in\mathbf{C}^{M_sN_s\times1}$，并考虑噪声的影响，FDA 三维 SAR 的稀疏线性测量模型可表示为

$$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{\Phi\Psi\alpha}+\boldsymbol{n}=\boldsymbol{\Theta\alpha}+\boldsymbol{n}, \tag{14}$$

其中：$\boldsymbol{\Theta}\in\mathbf{C}^{M_sN_s\times G}$ 为回波传感矩阵；$\boldsymbol{n}\in\mathbf{C}^{M_sN_s\times1}$ 为回波数据中的噪声向量；$\boldsymbol{\Phi}\in\mathbf{C}^{M_sN_s\times G}$ 为稀疏回波测量矩阵，其表达式为

$$\boldsymbol{\Phi}=\begin{Bmatrix} \exp[-j2\pi(f_0+q_{1,1}\Delta f)\tau_{1,1}(1)] & \cdots & \exp[-j2\pi(f_0+q_{1,1}\Delta f)\tau_{1,1}(G)] \\ \vdots & & \vdots \\ \exp[-j2\pi(f_0+q_{1,N_s}\Delta f)\tau_{1,N_s}(1)] & \cdots & \exp[-j2\pi(f_0+q_{1,N_s}\Delta f)\tau_{1,N_s}(G)] \\ \vdots & & \vdots \\ \exp[-j2\pi(f_0+q_{M_s,1}\Delta f)\tau_{M_s,1}(1)] & & \exp[-j2\pi(f_0+q_{M_s,1}\Delta f)\tau_{M_s,1}(G)] \\ \vdots & & \vdots \\ \exp[-j2\pi(f_0+q_{M_s,N_s}\Delta f)\tau_{M_s,N_s}(1)] & \cdots & \exp[-j2\pi(f_0+q_{M_s,N_s}\Delta f)\tau_{M_s,N_s}(G)] \end{Bmatrix}。\quad (15)$$

2.2 目标散射系数重构算法

鉴于贪婪迭代思想的正交匹配追踪(OMP)算法具有结构简单、收敛速度快[22]等优点,采用 OMP 算法对 FDA 三维 SAR 稀疏回波信号进行数据重构,具体步骤如下:

1)初始化。预设稀疏度 K 作为算法迭代的终止条件,K 即场景中的目标个数;$\boldsymbol{r}$ 为残差,初始值 $\boldsymbol{r}_0$ 为回波列向量 $\boldsymbol{y}$;残差门限为 ε,一般设置为 0.001 以下;初始索引集和重构原子集合为空集。

2)寻找残差最大相关原子索引并更新索引集。根据

$$t_k=\arg\max_{j=1,2,\cdots,G}|\langle\boldsymbol{\theta}_j,\boldsymbol{r}_{k-1}\rangle|,$$

计算残差 $\boldsymbol{r}$ 与传感矩阵 $\boldsymbol{\Theta}$ 各列 $\boldsymbol{\theta}_j$ 内积的最大值,并记录每次迭代后对应的残差与各列内积的脚标 t,t 的集合为 $\boldsymbol{T}$;根据 $\boldsymbol{T}_k=\boldsymbol{T}_{k-1}\cup\{t_k\}$,更新当前的索引集,根据 $\boldsymbol{\Theta}_k=\boldsymbol{\Theta}_{k-1}\cup\boldsymbol{\theta}_{t_k}$,更新重构原子集合。

3)利用最小二乘法估计信号。根据

$$\hat{\boldsymbol{\alpha}}_k=\arg\min_{\boldsymbol{a}}\|\boldsymbol{y}-\boldsymbol{\Theta}_k\boldsymbol{\alpha}_k\|_2$$

重构散射系数向量,其中 $\hat{\boldsymbol{\alpha}}_k$ 为第 k 次迭代后的散射系数向量的估计值。

4)根据 $\boldsymbol{r}_k=\boldsymbol{y}-\boldsymbol{\Theta}_k\hat{\boldsymbol{\alpha}}_k$ 更新信号残差。

5)迭代终止判定和结果输出:若 $k\leqslant K$,且 $\|\boldsymbol{r}_k\|_2\geqslant\varepsilon$,则 $k=k+1$,继续进行迭代;否则,结束循环,输出结果,即为重构的目标散射系数 $\hat{\boldsymbol{\alpha}}$。

3 实验结果及分析

3.1 FDA 三维 SAR 成像仿真结果及分析

仿真实验参数如表 1 所示。由表 1 可知,航迹向和切航向的理论分辨率均为 2 m,高程向的理论分辨率为 1 m。BP 算法成像时,使用了全部回波数据。OMP 算法成像时,随机稀疏选取 N_s 个线阵阵元和 M_s 个观测位置,其中 N_s、M_s 均为 30,即重构仅使用 9%的回波数据,且成像分辨单元大小近似等于理论分辨率。

表 1 仿真实验参数

参数名称	参数值
载频 f_0/GHz	15
线阵阵元数 N	100
虚拟阵列观测点数 M	100
载机飞行高度 H/m	2 000
载机飞行速度 V/m·s^{-1}	30
频率增量 Δf /MHz	1
频率增量最大系数 L	150

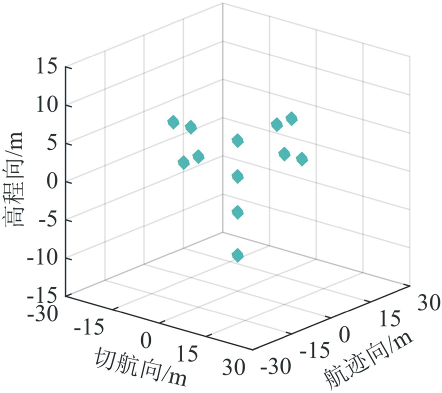
仿真实验场景中设置了 12 个点目标,各目标的直角坐标如表 2 所示,雷达回波加入信噪比为 30 dB 的高斯白噪声。

表 2 仿真实验点目标位置

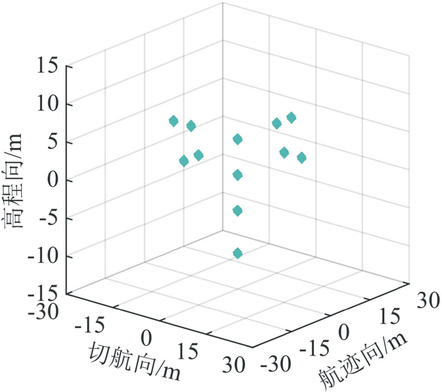
点目标	直角坐标/m	点目标	直角坐标/m
P1	(−20,0,5)	P7	(0,−15,5)
P2	(−15,0,5)	P8	(0,15,5)
P3	(0,0,5)	P9	(0,20,5)
P4	(15,0,5)	P10	(0,0,0)
P5	(20,0,5)	P11	(0,0,−5)
P6	(0,−20,5)	P12	(0,0,−10)

BP、OMP 算法对 12 个点目标的三维成像结果分别如图 2(a)、(b)所示,BP 算法图像的显示门限为最大值−10 dB,OMP 算法图像的显示门限为最大值−20 dB。从图 2 可看出,2 种成像算法得到的点目标位置与仿真设置的点目标位置一致,验证了压缩感知方法的合理性。

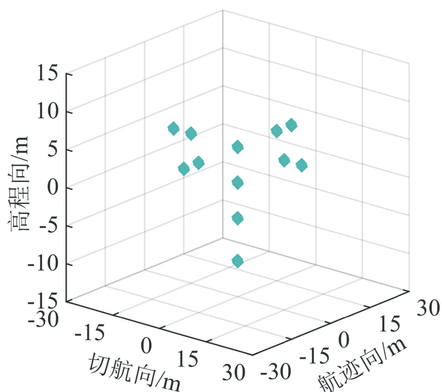
为了比较 2 种算法在性能上的差异,考察成像结果的目标背景比(TBR)、一阶差分均值(MFOD)和全图熵(ENT)三个图像重构质量指标。TBR 越大,目标相较于背景越突出,对图像噪声的抑制越充分;MFOD 越小,图像相邻像素的值越接近,目标区域也就越平滑;ENT 越小,图像越干净。2 种算法获得的三维成像结果的图像质量指标数据如表 3 所示。由于 FDA 阵元的频率增量系数和稀疏采样位置均随机选取,表 3 中的数据为 300 次实验结果的平均值。



(a) 空间点目标位置



(b) BP算法



(c) OMP算法

图 2　仿真实验 2 种算法的三维成像结果

表 3　仿真实验三维成像结果 TBR、MFOD 和 ENT 比较

成像算法	TBR/dB	MFOD	ENT
BP 算法	30.730	0.011 4	0.831 8
OMP 算法	69.568	6.647×10^{-4}	0.782 5

从表 3 可看出，OMP 算法三维成像结果的 TCR、MFOD 和 ENT 均优于 BP 算法，表明其图像更清晰，噪声对图像质量的影响更小。

为进一步分析 2 种算法的成像性能，取出点目标 P8 单独考察，比较其航迹向-切航向截面图以及航迹向、切航向和高程向的一维切片图。图 3、4 分别对应于 BP 算法和 OMP 算法的结果，其中幅值做了归一化处理。对比图 3、4 可知，BP 算法得到的点目标图像附近存在较多旁瓣，且 3 个维度的切片图都是标准的 sinc 函数形式；OMP 算法重构的点目标图像附近几乎看不到旁瓣，且其单个维度的切片图也都类似于冲激函数的形式，这表明 OMP 算法得到的目标图像能量更集中。

综上，OMP 算法的成像结果与 BP 算法相比，图像旁瓣得到明显抑制，成像质量得到提高。

3.2　FDA 三维 SAR 成像实测结果及分析

微波暗室实测场景如图 5 所示。在实测实验中，对 FDA 三维 SAR 模型进行了等价处理，即用一个发射-接收天线和一副二维扫描导轨在 x-y 轴平面形成虚拟 FDA 面阵，用导轨到目标转台的距离模拟载机飞行高度。

天线在每个阵元位置首先发射直达波对初始相位进行补偿，之后发射并接收一组不同频率增量的单频窄带信号，以便后续处理时各阵元从中随机选取频偏。实测实验参数如表 4 所示。使用压缩感知方法进行成像处理时，x 轴和 y 轴方向的随机稀疏采样阵元数均为 34 个，即 2 个维度的样本率均为 0.5。

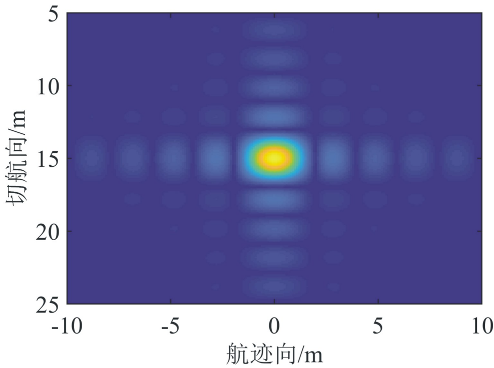
表 4　实测实验参数

参数名称	参数值
载频 f_0/GHz	10
x 轴方向虚拟阵元数 N	68
y 轴方向虚拟阵元数 M	68
模拟飞行高度 H/m	1.7
模拟飞行速度 $V/(\mathrm{m\cdot s^{-1}})$	0.75
频率增量 Δf /MHz	20
频率增量最大系数 L	25

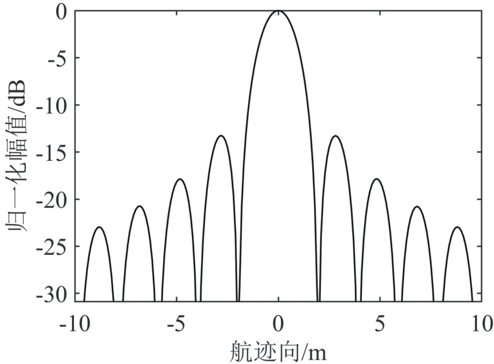
实测场景放置了 3 个金属球，将其看作 3 个点目标，如图 6 所示，直角坐标分别为(0，0，－0.3)、(0，0.2，0)和(－0.2，0，0)。由表 4 的实测实验参数可知，航迹向和切航向的理论分辨率约为 0.025 m，距离向理论分辨率约为 0.3 m。

图 7 (a)、(b)分别为 BP 算法和 OMP 算法的三维成像结果，图像显示门限为最大值－3 dB。从图 7 可看出，2 种算法得到的 3 个点目标位置与真实的位置均一致，但 OMP 算法有效抑制了目标旁瓣；同时，OMP 算法对目标散射系数的重构只使用约 25％的回波数据，大幅减少了三维成像需要调用的数据量。

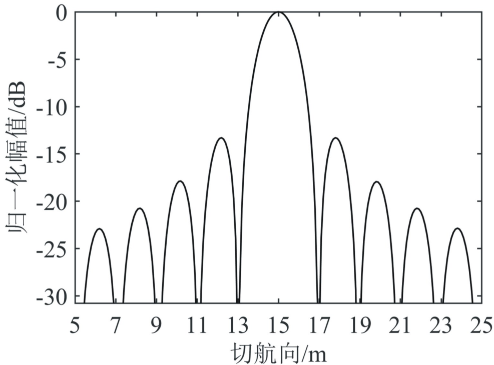
同样地，对图 7 中三维成像结果的 TBR、MFOD



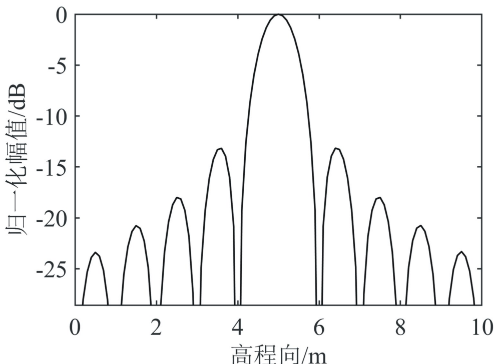
(a) 航迹向-切航向截面图



(b) 航迹向切片图

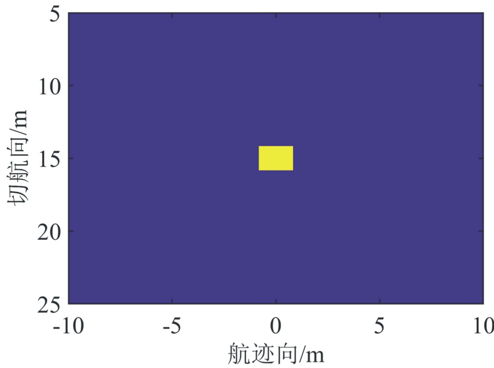


(c) 切航向切片图

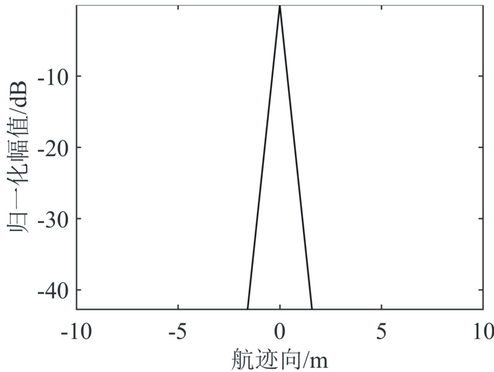


(d) 高程向切片图

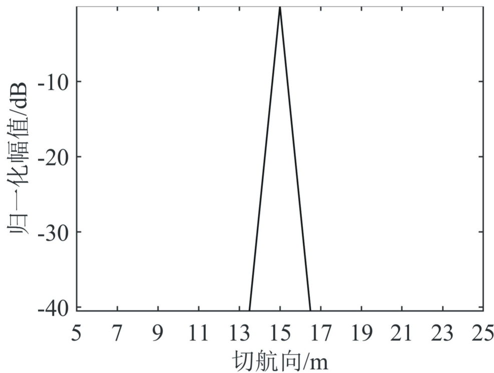
图 3 仿真实验 BP 算法点目标 P8 截面图与切片图



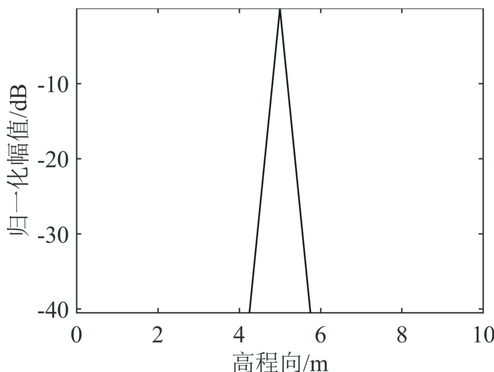
(a) 航迹向-切航向截面图



(b) 航迹向切片图



(c) 切航向切片图



(d) 高程向切片图

图 4 仿真实验 OMP 算法点目标 P8 截面图与切片图

和 ENT 进行分析,其数据结果如表 5 所示。为评估稀疏采样对成像的影响,表 5 中还增加了压缩感知满阵元观测实验结果的数据。由于阵元频偏系数和稀疏采样位置是随机选取的,表 5 中数据为 100 次实验结果的平均值。

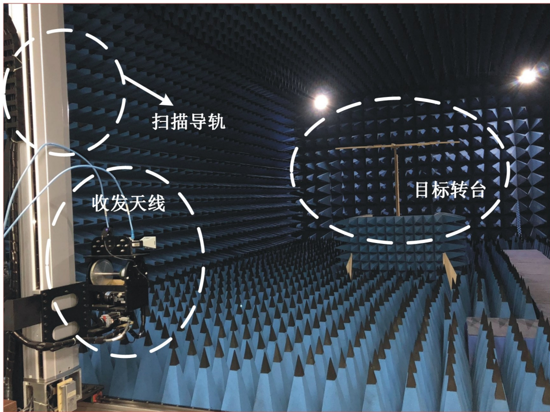


图 5　微波暗室实测场景

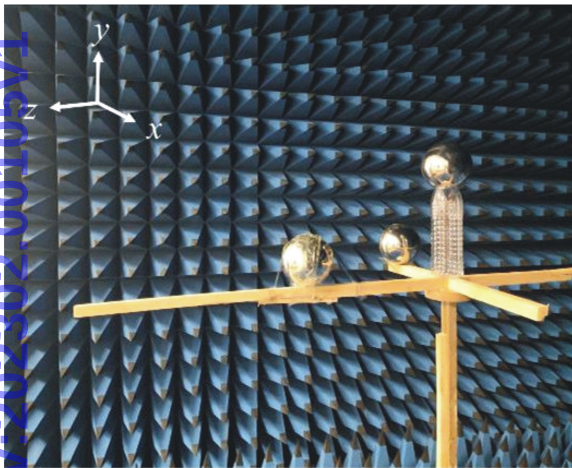


图 6　目标在实测场景中的位置

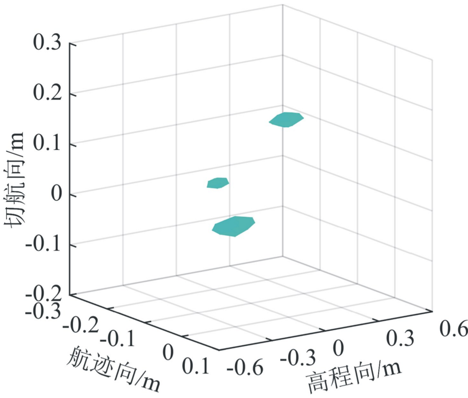
表 5　实测实验三维成像结果 TBR、MFOD 和 ENT 比较

成像算法	TBR/dB	MFOD	ENT
传统 BP 算法	22.414	0.042 9	0.732 3
满观测 OMP 算法	69.266	$6.886\,3\times10^{-4}$	0.703 9
稀疏观测 OMP 算法	69.004	$6.985\,5\times10^{-4}$	0.707 6

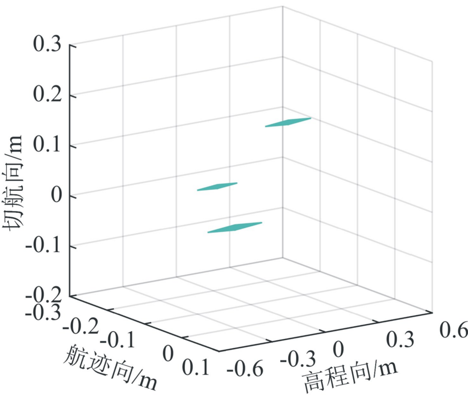
由表 5 可知，BP 算法成像质量最差，图像旁瓣和背景噪声的影响也最突出；满观测 OMP 算法的成像结果在 TCR、MFOD 和 ENT 等 3 个图像质量指标上均优于传统 BP 算法，对场景杂波和噪声干扰的抑制较充分，成像质量明显提升。稀疏观测 OMP 算法在 TCR、MFOD 和 ENT 上和满观测 OMP 算法区别不大，但稀疏采样使得数据处理量大幅减少，验证了稀疏成像的可行性。

4　结束语

将压缩感知理论应用到频率分集阵列三维 SAR 的成像中，结合频率分集阵列的特点，通过在切航向随机稀疏选取阵元，在航迹向随机稀疏选取观测位置，实现了对回波数据的二维稀疏采样，减少了成像端的数据处理量。与 BP 算法相比，OMP 算法还有效抑制了目标图像旁瓣，成像质量明显提升。仿真和实测实验结果验证了所提成像算法的合理性和有效性。



(a) BP算法



(b) OMP算法

图 7　实测实验 2 种算法的三维成像结果

参考文献：

[1] GIRET R, JEULAND H, ENERT P. A study of a 3D-SAR concept for a millimeter wave imaging radar onboard an UAV[C]//IEEE European Radar Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2004: 201-204.

[2] 张晓玲，师君，韦顺军，等. 三维合成孔径雷达[M]. 北京：国防工业出版社，2017：12-13.

[3] ANTONIK P, WICKS W C, GRIFFITHS H D, et al. Frequency diverse array radars[C]//Proceedings of the IEEE Radar Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006: 470-475.

[4] 王文钦，邵怀宗，陈慧. 频控阵雷达：概念、原理与应用[J]. 电子与信息学报，2016，38(4)：1000-1011.

[5] 许京伟，朱圣棋，廖桂生，等. 频率分集阵雷达技术探讨[J]. 雷达学报，2018，7(2)：167-182.

[6] LIU Yimin, RUAN Hang, WANG Lei, et al. The random frequency diverse array: a new antenna structure for uncoupled direction-range indication in active sensing[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2017, 11(2): 295-308.

[7] 马园,欧阳缮,廖可非,等. 基于随机频偏调制的频率分集阵雷达通信一体化波形[J]. 桂林电子科技大学学报, 2019, 39(4): 259-266.

[8] FAROOQ J, TEMPLE M A, SAVILLE M A. Application of frequency diverse arrays to synthetic aperture radar imaging[C]//International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007: 447-449.

[9] LIN Chenchen, HUANG Puming, WANG Weiwei, et al. Unambiguous signal reconstruction approach for SAR imaging using frequency diverse array[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(9): 1628-1632.

[10] WANG Chenghao, XU Jingwei, LIAO Guisheng, et al. A range ambiguity resolution approach for high-resolution and wide-swath SAR imaging using frequency diverse array[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2017, 11(2): 336-346.

[11] HUANG Bang, WANG Wenqin, ZHANG Shunsheng, et al. A novel approach for spaceborne SAR scattered-wave deception jamming using frequency diverse array[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020, 17(9): 1568-1572.

[12] WANG Hui, ZHANG Shunsheng, WANG Wenqin, et al. Multi-scene deception jamming on SAR imaging with FDA antenna[J]. IEEE Access, 2020, 8: 7058-7069.

[13] LI Jingjing, LIAO Kefei, OUYANG Shan. 3-D imaging using synthetic aperture radar with a frequency diverse array[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 18(5): 846-850.

[14] BARANIUK R, STEEGHS P. Compressive radar imaging[C]//IEEE Radar Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007: 128-133.

[15] YANG Jungang, THOMPSON J, HUANG Xiaotao, et al. Segmented reconstruction for compressed sensing SAR imaging[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(7): 4214-4225.

[16] BAO Qian, PENG Xueming, WANG Zhirui, et al. DLSLA 3-D SAR imaging based on reweighted gridless sparse recovery method[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(6): 841-845.

[17] KANG Le, SUN Tianchi, LUO Ying, et al. Downward-looking linear array three-dimensional SAR imaging based on the two-dimensional mismatch compensation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 258-269.

[18] WU Chunxiao, ZHANG Zenghui, LIANG Xingdong, et al. Fast 3-D imaging algorithm based on unitary transformation and real-valued sparse representation for MIMO array SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(9): 7033-7047.

[19] 闫敏,韦顺军,田博坤,等. 基于稀疏贝叶斯正则化的阵列 SAR 高分辨三维成像算法[J]. 雷达学报, 2018, 7(6): 705-716.

[20] 李晶晶. 频率分集阵列雷达目标定位与成像方法研究[D]. 桂林:桂林电子科技大学, 2020: 75-77.

[21] AUSTIN C D, ERTIN E, MOSES R L. Sparse signal methods for 3-D radar imaging[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2011, 5(3): 408-423.

[22] TROPP J A, GILBERT A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(12): 4655-4666.

编辑:张所滨